第40卷 第6期
2023年6月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 6
Jun. 2023

# 北非埃及地区风蚀沙尘时空变化研究

薛一波[1,2]， 张小啸[2]， 雷加强[2]， 李生宇[2]， 王永东[2]， 尤 源[2]

（1. 中国科学院大学，北京 101408; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

**摘 要：**通过分析1990—2020年北非埃及气象观测数据和卫星遥感资料，研究风蚀沙尘的时空变化特点，并阐明主要影响因素。结果显示：埃及近30 a沙尘天气发生频次在20~65 d·a$^{-1}$之间变化，整体呈现出逐渐降低的变化趋势，总悬浮颗粒物（Total Suspended Particulates，TSP）年均浓度在400~1200 μg·mg$^{-3}$之间波动，在全球干旱区处于较高强度水平；扬沙天气发生频率最高，其次是浮尘、沙尘暴和强沙尘暴天气，其中春、夏两季扬沙天气日数占全年沙尘天气总日数的60%以上，环境TSP浓度与沙尘天气发生频次高度相关；近30 a埃及地面风速呈现减小趋势，风力侵蚀作用是影响地区空气质量的关键因素；沙尘天气频率与大西洋多年代际振荡（Atlantic Multidecadal Oscillation，AMO）指数显著负相关，相关系数约为-0.67。本研究为全面了解北非埃及地区风蚀沙尘的时空变化特征和预防沙尘暴灾害提供理论依据和数据支持。

**关键词：**埃及；风蚀沙尘；时空变化；环境演变

荒漠化是世界瞩目的严重生态环境问题，它直接影响着人类社会经济的可持续发展。全球每年约有900~3300 Mt的土壤表层物质被风力侵蚀、搬运和堆积[1]，产生的风蚀沙尘物质主要以细颗粒物为主，是影响区域乃至全球最严峻的环境问题之一。因土壤风蚀引起的沙尘活动及其物质运输过程严重影响干旱半干旱地区的荒漠化进程，同时对区域气候变化、地面太阳辐射强度、地形地貌演变、人类健康等均有重大影响，该活动过程与全球环境变化紧密相连[2-5]。因此，风蚀沙尘的相关科学研究受到国际广泛关注。

北非撒哈拉地区每年向大气中释放约500~1000 Mt的沙尘，占全球沙尘量的50%以上[6]。埃及地处撒哈拉沙漠边缘，是全世界受荒漠化危害最为严重的国家之一[7]。近年来，随着人们对风蚀沙尘天气带来的环境问题愈发重视，相关领域的学者使用多源观测资料对埃及的沙尘天气进行了大量深入的研究。例如，Wang等[8]和潘琳等[9]通过研究发现，埃及东部是北非6个主要沙源区之一，并且确定春季沙尘暴发生最为频繁，8—11月处于沙尘暴最弱时段；Mohammed等[7]利用MODIS数据对埃及大气气溶胶进行长期高分辨率研究发现，埃及1—4月高强度的沙尘事件多数是由西部沙漠的沙尘暴引起；Imen等[10]通过估算北非地区沙尘排放潜力指出，埃及沙尘排放具有很强的时空异质性，并且高强度的沙尘排放主要发生在河流沉积物丰富的地区；Hamdy等[11]利用开罗14个监测地点的$PM_{10}$浓度数据，分析大气颗粒物的变化特征发现，在较高风速下，地表大量相对松散的沙尘颗粒被吹起，严重影响大气颗粒物浓度水平；Ehteram等[12]通过分析北非地区沙尘暴的时空变化及其影响因素表明，埃及近20 a沙尘暴发生频率有明显的上升趋势，同时指出气温和风速是最显著的影响因素；李双林等[13]和胡淼等[14]指出，在全球变暖背景下，埃及沙尘天气的影响因素与大西洋多年代际振荡（Atlantic Multidecadal Oscillation，AMO）密切相关，冬季AMO所引起的大西洋海温异常会进一步导致埃及的风速、降水和气温等异常变化，对气候的年代际变化有显著调节作用。上述关于埃及沙尘天气的时空分布特征、沙尘排放特点及影响因素等方面的研究多集

**收稿日期：**2022-10-07； **修订日期：**2023-02-22
**基金项目：**中国科学院西部青年学者项目（2020-XBQNXZ-015）；国家自然科学基金项目（42177088）
**作者简介：**薛一波（2000-），男，硕士研究生，主要从事干旱区大气环境方面的研究. E-mail: xueyibo22@mails.ucas.ac.cn
**通讯作者：**张小啸. E-mail: zhangxx@ms.xjb.ac.cn

中在开罗和尼罗河三角洲部分地区。随着埃及西部沙漠土地复垦工程[7]的出现,有必要针对埃及全国和地理位置特殊的典型城市的风蚀沙尘时空变化研究进行更加深入的研究。

埃及作为"一带一路"倡议的重要沿线国家,面临着恶劣的干旱自然条件和极为严重的风沙灾害。风蚀沙尘对当地重要交通和重点工程等基础设施也造成了非常显著的负面影响。因此,充分了解和掌握埃及地区风蚀沙尘的时空变化规律和荒漠化现状有助于厘清和明晰该区域资源环境问题,也有利于夯实中国对非技术合作的基础。本文以1990—2020年埃及卫星遥感产品和12个城市气象观测记录等资料为依据,分析埃及风蚀沙尘的时空变化特点和规律,阐明主要影响因素,并且重点选取了马特鲁(Mersa Matruh)、赫尔格达(Hurguada)、开罗(Cairo)和哈尔加(Kharga)4个典型代表城市来分析埃及不同地区沙尘频率的年际变化特征,为研究埃及全国的风蚀沙尘时空变化特点和预防沙尘暴灾害提供理论依据和数据支持。

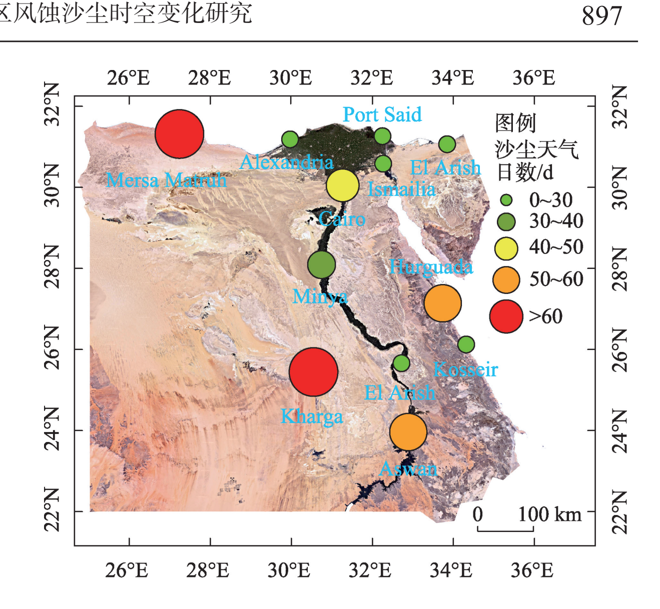
## 1　数据与方法

### 1.1　研究区概况

埃及地处沙源地——撒哈拉沙漠边缘(图1),毗邻地中海和红海,常年炎热干燥少雨,受沙漠和戈壁粉尘物质的影响严重。埃及年均气温11~32 ℃,多年平均降水量小于50 mm,年蒸发量在2600 mm以上,年均相对湿度低于39%;北部沿海地区和尼罗河三角洲属于亚热带地中海气候,南部地区属于热带沙漠气候[15]。埃及的干旱沙漠区域约占国土95%以上,大部分地区在海拔100~700 m之间,西部连接利比亚沙漠,以流沙地表为主,红海沿岸和西奈半岛主要是丘陵山地,东部阿拉伯沙漠以砾石荒漠和裸露岩石为主[9]。埃及西部沙漠地表土质较为疏松,植被覆盖率很低,长期受风蚀沙尘天气影响,沙尘日数较多,尤其在春季4—5月间多大风和沙尘暴天气[6]。

### 1.2　数据来源与方法

埃及1990—2020年的常规气象要素数据和沙尘天气过程资料来自国家气象中心,通过全球通信系统获取的埃及地面气象站点每日常规观测数据,气象站点共12个。气象要素数据包括能见度、风速、气温和降水,观测记录时间间隔为3 h。根据该




注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2021)5443号,对底图边界无修改。

图1　埃及地区卫星遥感影像图和气象站观测年均沙尘频率空间分布(1990—2020年)

Fig. 1　Satellite image and spatial distribution of annual average frequency of dust day as observed by meteorological stations in Egypt (1990-2020)

数据资料得出埃及沙尘天气日数年际变化、总悬浮颗粒物(Total Suspended Particulates,TSP)浓度年际年内变化、最大风速年际变化和风力等级年内分布比率、降水和气温的年际年内变化,并且选取了马特鲁(Mersa Matruh)、赫尔格达(Hurguada)、开罗(Cairo)和哈尔加(Kharga)4个地理位置特殊的典型代表站点来分析埃及不同地区沙尘频率的年际变化特征。埃及沙漠区域的遥感空间影像数据来源于MODIS产品。

沙尘天气根据世界气象组织(https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10235)、Shao等[16]和Zhang等[17]的划分标准,主要依据水平能见度划分为以下4种类型:浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴。水平能见度＜10 km时为浮尘;水平能见度在1~10 km时为扬沙;水平能见度200~1000 m时为沙尘暴;水平能见度＜200 m时为强沙尘暴。大气中的总悬浮颗粒物(TSP)浓度数据是根据Shao等[16]提出的TSP转化公式计算统计得出,可将能见度数据转化为TSP浓度,公式如下。

$$C=\begin{cases}3802.29\times D_V^{-0.84}, & 0<D_V<3.5\ \text{km}\\ \exp(-0.11\times D_V+7.62), & D_V\geqslant 3.5\ \text{km}\end{cases}$$

式中:$C$为TSP浓度;$D_V$为能见度。

## 2 结果与分析

### 2.1 埃及沙尘天气频率年际变化特征

风蚀沙尘天气频率可以表征区域风沙活动的强度[18]。图2显示了1990—2020年埃及沙尘天气发生频率的年际变化特征，可以看出：20世纪末（1991年）埃及沙尘天气频率年均值最大，约为63 d·a$^{-1}$，随后急剧下降至1999年的27 d·a$^{-1}$，21世纪初沙尘频次变为小幅波动变化，2014年降至最低值23 d·a$^{-1}$，2015—2020年又恢复到同期较高沙尘强度水平。总体而言，近30 a埃及沙尘天气频率整体呈下降趋势，大体在20~65 d·a$^{-1}$之间变化，这在全球干旱区处于较高的强度水平。高频次风蚀沙尘天气会改变下垫面的特征进而影响降水量和气温等变化[19-21]。受沙尘天气所影响的城市沙尘暴发生频次与TSP浓度高度正相关，并且埃及沙尘天气频率与AMO指数呈显著负相关关系，相关系数约为−0.67（图3）。高频次的沙尘天气会对荒漠化进程产生直接影响，加剧埃及地区的干旱程度。

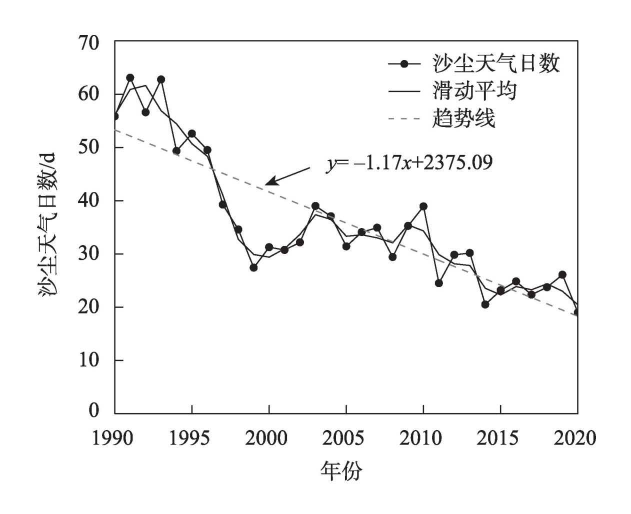



图2 1990—2020年埃及地区沙尘天气频率年际变化特征

Fig. 2 Interannual variation characteristics of aeolian dust frequency in Egypt (1990−2020)

为了解埃及不同地区沙尘天气频率的年际变化特征，重点选取了马特鲁（Mersa Matruh）、赫尔格达（Hurguada）、开罗（Cairo）和哈尔加（Kharga）4个典型站点，分别统计了1990—2020年浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴4种天气现象的年际变化特征（图4）。由图4可知，埃及西北部沿海城市马特鲁的强沙尘暴和沙尘暴天气频率最高，年均日数2 d以上，赫尔格达和开罗两地次之，哈尔加最低。4个站点

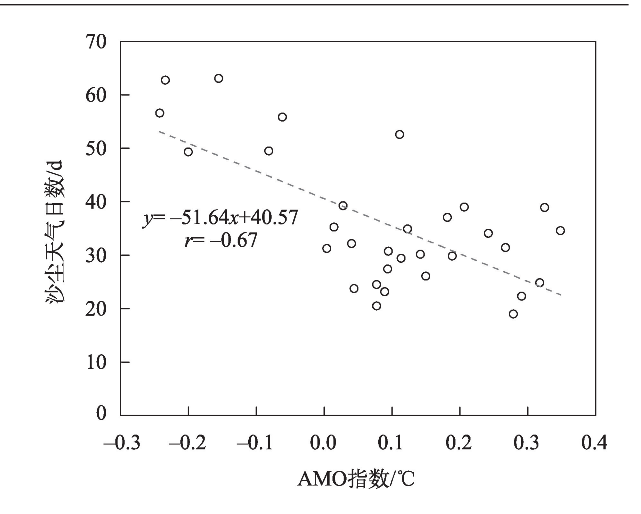



图3 1990—2020年埃及地区风蚀沙尘天气频率与AMO关系

Fig. 3 Relationship between aeolian dust frequency in Egypt and AMO (1990−2020)

的扬沙天气频率占比较大，其中哈尔加最高，年均64 d左右，处于较高水平，其次是马特鲁、赫尔格达和开罗，扬沙天气频率年均值分别维持在58 d、52 d和39 d左右，这可能与当地的地理位置和大风天气有关[22]，哈尔加是埃及西部沙漠中最发达的绿洲城市，受沙漠和戈壁粉尘物质的影响较为严重，并且大风天气频发[7]，使得扬沙天气频率相对较高。此外，4个典型站点近30 a浮尘天气频率整体变化趋势相对稳定，维持在较低水平。

### 2.2 埃及环境TSP浓度时间变化特征

图5显示了埃及1990—2020年TSP浓度的年际和年内变化，21世纪初年均TSP浓度在500~800 μg·m$^{-3}$之间波动且逐渐下降（图5a），这可能与当地浮尘和扬沙日数变化有关[23]。从季节变化上看，春季TSP浓度在400~2400 μg·m$^{-3}$上下波动，维持在较高水平。从6月起，TSP浓度高值区开始逐渐收缩，在8月达到最低值，随后在秋、冬两季又逐渐升高。春季高浓度TSP浓度与沙尘频率高度相关，据当地环境观测站的监测数据显示：2010年3—5月沙尘暴期间TSP平均浓度可达1315 μg·m$^{-3}$，其他月份TSP平均浓度为542 μg·m$^{-3}$。由此可知，沙尘极端天气TSP浓度普遍高于非沙尘期。

结合图5和图6，埃及TSP浓度和最大风速的年内变化高度相关。如12月至次年4月，TSP浓度逐渐增高，风速也逐渐增大，达到年内最高值；从4—11月，风速相对减弱，TSP浓度也随之下降，保持在800 μg·m$^{-3}$以下的较低水平。埃及春季TSP浓度极

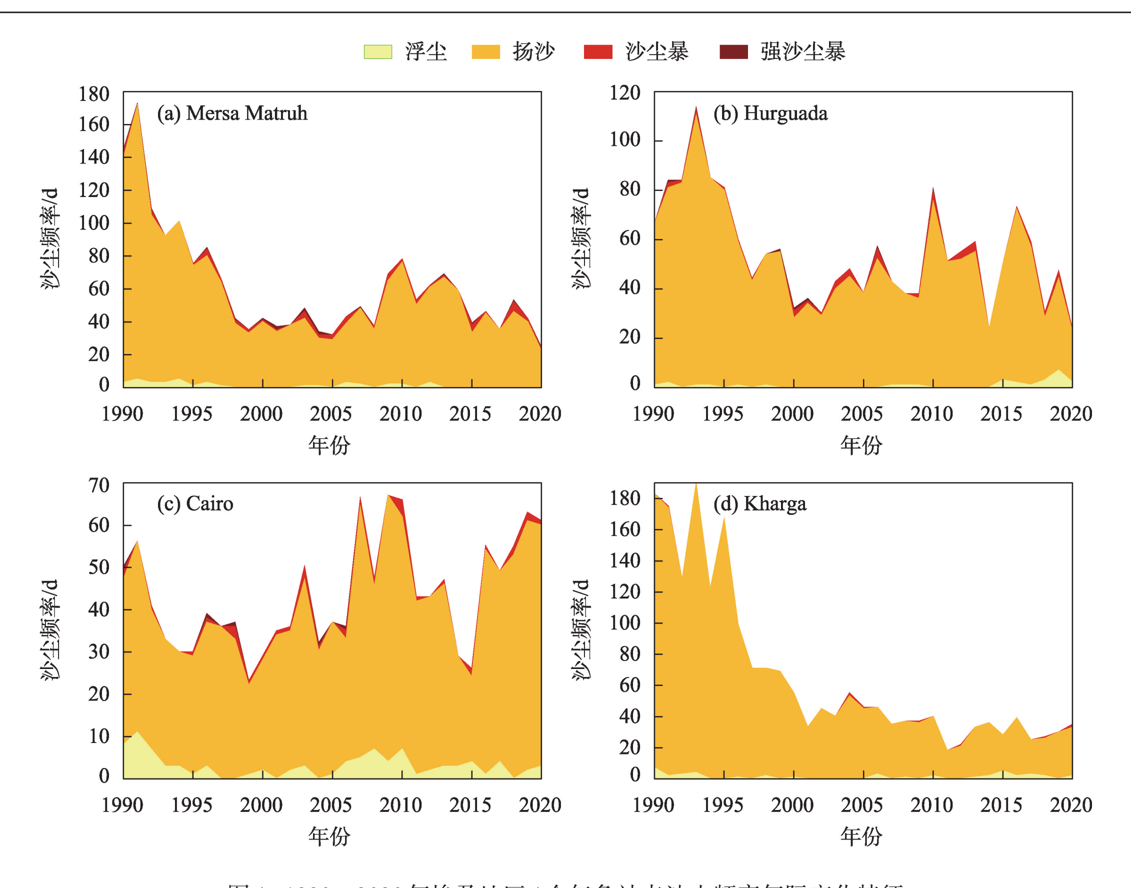



图4 1990—2020年埃及地区4个气象站点沙尘频率年际变化特征

Fig. 4 Variation of aeolian dust frequency at four meteorological stations in Egypt (1990–2020)

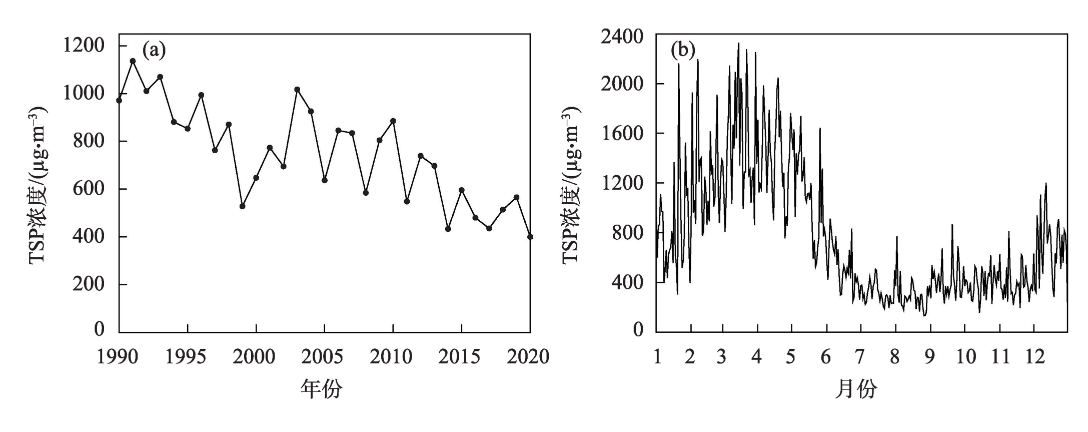



图5 埃及地区TSP浓度的年际变化(a)和年内变化(b)

Fig. 5 Interannual (a) and intra-annual (b) variation of TSP concentrations in Egypt

值可达2300 μg·m$^{-3}$以上,保持在相对较高水平,沙尘活动随风力等级及持续时间的增加愈发强烈。同时,沙尘天气发生频次也直接影响到环境TSP浓度的变化[24]。由气象观测数据可知,埃及环境TSP浓度与沙尘天气发生频次相关系数为0.89,呈高度相关关系。随着沙尘天气频率的增高,环境TSP浓度明显增大,频繁的沙尘天气以及相对较高的TSP浓度,会加剧埃及地区的干旱程度。

### 2.3 影响因素分析

2.3.1 风速 图6显示了1990—2020年埃及最大风速的年际变化趋势以及不同风力等级的年内分布比率。由此可知,埃及近30 a最大平均风速约为5.9 m·s$^{-1}$(图6a),扬沙天气频发,风蚀强度较高。埃及主要以4级风力为主,占全年的90%以上(图6b),导致该地区TSP浓度与沙尘暴天气发生频次的相关性较高[25]。春、夏两季扬沙天气日数占全年沙尘天

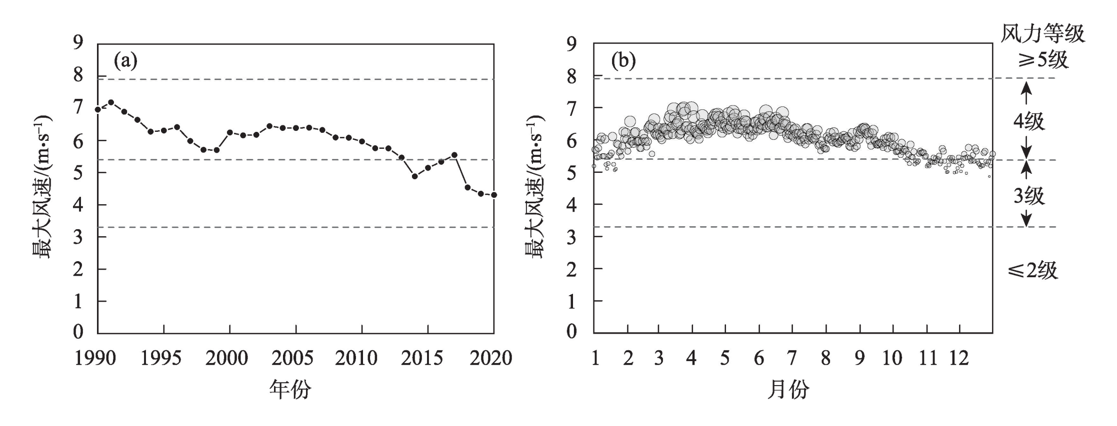



图6　埃及最大风速的年际变化(a)和不同风力等级年内分布比率(b)

Fig. 6　Interannual (a) and intra-annual (b) variation of maximum wind speed in Egypt

气总日数的60%以上,秋、冬两季风蚀强度显著降低,平均风速在5.6 m·s⁻¹左右。由于沙尘传输方向受控于风向,因此沙尘天气的年内变化也与主风向变化有关[26-27]。埃及地区全年均在25°~32°N存在一股明显的、由北向南然后在25°N以南转为东北风的气流,北非沙尘可伴随较强的偏东分量气流在埃及扩散[9],风力侵蚀作用将沙漠粉尘颗粒物通过大气环流输送到埃及,进而影响着埃及城市的空气质量,这与沙漠粉尘颗粒物的风蚀观测实验结果[28-30]相一致。总体而言,埃及近30 a风速减小趋势明显,这可能是由于环流场发生变化导致气压梯度力改变以及人类活动造成下垫面粗糙度改变等多种因素[31-32]造成的。在全球变暖背景下,埃及地区海陆、南北热力差异同时减小,造成对流层低层气压梯度力减弱,进而导致地面风速减小[31]。此外,人为改造绿洲的荒漠化治理措施促使埃及地区植被覆盖率上升,导致地表粗糙度增加,造成地面拖曳力变大,从而减弱埃及地面风速[32]。

2.3.2　降水　降水对气溶胶的湿清除过程是大气中沙尘气溶胶重要的沉降过程之一。图7a和图7b显示了埃及1990—2020年降水的年际和年内变化。可以看出:埃及长期干旱少雨,降水量年际变化不规律。2015年降水量达到最大值,约526 mm;1995年降水量则最低,仅约为41 mm。总体而言,1990年以来埃及年均降水量在185 mm以下,由于降水总量较小,所以该地区主要以大气干沉降为主。降水量年内变化也极不规律(图7b),具有强烈的季节性特点,夏季日均降水量最低,不足0.1 mm;秋季9月开始降水量逐渐增加,12月达到1.1 mm·d⁻¹;冬季2月降水达到1.2 mm·d⁻¹,是一年中降水量最大的月份。尽管春、冬两季降水逐渐增多,但最大降水量期间(12月至次年3月)月降水强度均低于1.1 mm。这可能与AMO引起的热带大西洋海温异常有关[13]。当热带大西洋变冷(AMO冷相位)时,会导致热带大西洋上空雨带北移,同时会增加跨赤道向北的风场异常,从而增加埃及地区冬季降水[14]。当AMO处于暖相位时,埃及夏季存在低压异常中心,与降水量的减少密切相关[33-35]。总之,埃及地区全年干燥少雨,降水量小且变率大,降水对大气颗粒物污染的湿清除作用极为有限,冬季降水强度对荒漠化的影响较为关键。

2.3.3　气温　图7c和图7d显示了埃及气温的年际和年内变化,可以看出:埃及全年气温在11~31 ℃之间,夏季温度明显高于冬季,在8月出现最高值。总体而言,近30 a年埃及气温有缓慢增高趋势,这可能与AMO暖相位和温室气体强迫增加有关[36-40]。AMO通过影响大气环流引起北非地区对流层气温升高,加强海陆之间的热力差异,最终导致埃及夏季风增强[36]。并且,近年来埃及地区人为活动的增加导致温室气体强迫加重,二者叠加最终导致埃及气温呈缓慢上升的趋势[37-38]。温度升高会增加地表蒸发量,导致更多的水分散失,不利于荒漠化逆转[39-40]。结合埃及风场可知,冬季盛行东北风和东风,大气层结相对稳定,以下沉气流为主,天气晴朗,干燥少雨,会加剧荒漠化进程。

## 3　结 论

本文基于1990—2020年埃及地面气象站点每日常规观测数据和卫星遥感资料,详细分析了该地区的沙尘天气发生日数变化特征和环境TSP浓度时

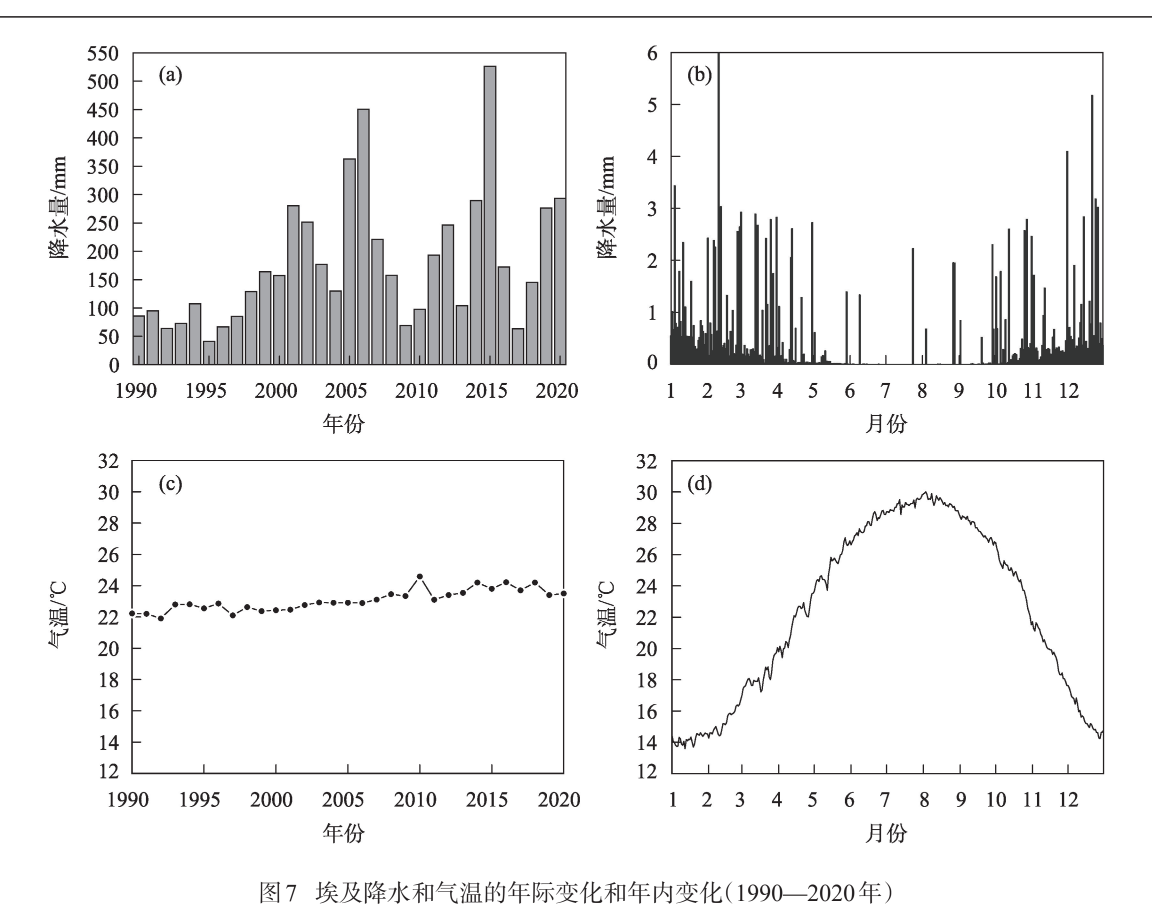



图7　埃及降水和气温的年际变化和年内变化(1990—2020年)

Fig. 7　Variation of intra-annual and inter-annual precipitation and temperature in Egypt (1990-2020)

间变化规律,讨论了风速、降水量和气温等因素对埃及地区风沙活动的影响作用。

(1)埃及风蚀沙尘天气频率在20~65 $d\cdot a^{-1}$之间变化,年均TSP浓度在400~1200 $\mu g\cdot m^{-3}$之间波动下降,在全球干旱区处于较高的强度水平,并且埃及沙尘天气频率与AMO显著负相关。由于地理位置和大风天气的影响,埃及不同地区沙尘天气频率变化特征的差异性明显。

(2)埃及春、夏两季扬沙天气日数占全年沙尘天气总日数的60%以上,4级风力等级占全年的90%以上,TSP浓度与沙尘暴天气发生频次呈正相关关系,来自于撒哈拉沙漠的风蚀沙尘颗粒物是埃及大气颗粒污染物的主要来源。

(3)近30 a埃及风速减小趋势明显,这可能与气压梯度力和下垫面粗糙度的改变等多种因素有关。风力侵蚀作用将沙漠粉尘颗粒物通过大气环流输送到埃及,是影响该地区空气质量的关键因素。

(4)埃及近30 a气温呈缓慢上升的趋势,这可能与AMO处于暖相位和温室气体强迫增加有关。AMO处于冷相位会增加埃及冬季降水;AMO暖相位减少夏季降水。埃及降水量年内年际变化极不规律,最大降水量期间(12月至次年3月)月降水强度对荒漠化的影响较为关键。

## 参考文献(References):

[1] 王训明, 周娜, 郎丽丽, 等. 风沙活动对陆地生态系统影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(6): 627-635. [Wang Xunming, Zhou Na, Lang Lili, et al. Research progress on the impact of aeolian sand activity on terrestrial ecosystems[J]. Advances in Earth Sciences, 2015, 30(6): 627-635. ]

[2] IPCC. Climate Change 2013-The Physical Science Basis[M]. New York: Cambridge University Press, 2013: 571-597.

[3] IPCC. Climate Change 2021-The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 1-195.

[4] Alfaro S C. Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion[J]. Geomorphology, 2007, 93(3): 157-167.

[5] Goudie A S. Desert dust and human health disorders[J]. Environment International, 2014, 63: 101-113.

[6] 邸文婧. 北非地区气溶胶南北空间型分布特征及其成因[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [Di Wenjing. Spatial Distribution Character-

istics and Genesis of Aerosols in North Africa[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. ]

[7] Mohammed S, Muhammed E, Alaa I, et al. Long-term, high-resolution survey of atmospheric aerosols over Egypt with NASA's MODIS data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(10): 10−27.

[8] Wang Y Q, Stein A F, Draxler R R, et al. Global sand and dust storms in 2008: Observation and HYSPLIT model verification[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(35): 6368−6381.

[9] 潘琳, 韩永翔, 陆正奇, 等. 北非沙尘天气时空分布特征及其远程传输路径[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 76−84. [Pan Lin, Han Yongxiang, Lu Zhengqi, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of sand and dust weather in North Africa and its long-distance transmission path[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2020, 40(1): 76−84. ]

[10] Imen G, S N B, Hosni G. Identifying natural dust source regions over the Middle-East and North-Africa: Estimation of dust emission potential[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 165: 342−355.

[11] Hamdy K. Elminir. Dependence of urban air pollutants on meteorology[J]. Science of the Total Environment, 2005, 350(1): 225−237.

[12] Ehteram J, Maryam R, Ommolbanin B, et al. Spatiotemporal variability of sand-dust storms and their influencing factors in the MENA region[J]. Theoretical and Applied Climatology volume, 2022, 149: 1357−1371.

[13] 李双林, 王彦明, 郜永祺. 北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述[J]. 大气科学学报, 2009, 32(3): 458−465. [Li Shuanglin, Wang Yanming, Gao Yongqi. A review of the climatic effects of interdecadal oscillation (AMO) in the North Atlantic[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 32(3): 458−465. ]

[14] 胡淼, 龚道溢, 王璐, 等. 1—3月北极涛动对北半球热带太平洋和大西洋对流活动的可能影响[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 479−491. [Hu Miao, Gong Daoyi, Wang Lu, et al. Possible effects of Arctic oscillation on tropical Pacific and Atlantic convective activities in the northern hemisphere from January to March[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 479−491. ]

[15] 袁国映. 北非撒哈拉沙漠腹地地理环境特征——与塔克拉玛干沙漠对比[J]. 干旱区研究, 2003, 20(3): 235−239. [Yuan Guoying. Geographical characteristics of the hinterland of the Sahara Desert in North Africa: Comparison with the Taklamakan Desert [J]. Arid Zone Research, 2003, 20(3): 235−239. ]

[16] Shao Y, Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring[J]. Global and Planetary Change, 2006, 52(1−4): 1−22.

[17] Zhang X X, Claiborn C, Lei J Q, et al. Aeolian dust in Central Asia: Spatial distribution and temporal variability[J]. Atmospheric Environment, 2020, 238: 117734.

[18] 李晋昌, 董治宝. 大气降尘研究进展及展望[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2): 102−109. [Li Jinchang, Dong Zhibao. Research progress and prospect of atmospheric dust precipitation[J]. Resources and Environment in Arid Lands, 2010, 24(2): 102−109. ]

[19] 刘新春, 钟玉婷, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地及周边地区$PM_{10}$时空变化特征及影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 323−330. [Liu Xinchun, Zhong Yuting, He Qing, et al. Spatial-temporal variation characteristics and influencing factors of $PM_{10}$ in the hinterland of Taklamakan Desert and surrounding areas[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 323−330. ]

[20] 李怡. 亚非夏季风系统的气候特征及其年代际变率研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017. [Li Yi. Study on Climate Characteristics and Interdecadal Variability of Asian-African Summer Wind System[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2017. ]

[21] 朱从祯, 赵天良, 孟露, 等. 浮尘气溶胶对沙漠大气边界层结构作用的昼夜差异[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1017−1026. [Zhu Congzhen, Zhao Tianliang, Meng Lu, et al. Different diurnal effects of floating dust on the structures in the atmospheric boundary layer over desert areas[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1017−1026. ]

[22] Zhang X X, Shi P J, Liu L Y, et al. Ambient TSP concentration and dustfall in major cities of China: Spatial distribution and temporal variability[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(13): 1641−1648.

[23] 刘新春, 钟玉婷, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程大气颗粒物浓度及影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1548−1553. [Liu Xinchun, Zhong Yuting, He Qing, et al. Analysis of atmospheric particulate matter concentration and influencing factors during sandstorm process in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1548−1553. ]

[24] Engelstaedter S, Tegen I, Washington R. North African dust emissions and transport[J]. Earth Science Reviews, 2006, 79(1−2): 73−100.

[25] Liu L Y, Shi P J, Gao S Y, et al. Dustfall in China's western Loess Plateau as influenced by dust storm and haze events[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(12): 1699−1703.

[26] Kumar P, Fennell P, Britter R. Effect of wind direction and speed on the dispersion of nucleation and accumulation mode particles in an urban street canyon[J]. Science of the Total Environment, 2008, 402(1): 82−94.

[27] 花婷, 王训明. 东亚干旱半干旱区沙漠化与气候变化相互影响研究进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(6): 841−852. [Hua Ting, Wang Xunming. Research progress on the interaction between desertification and climate change in arid and semi-arid areas of East Asia[J]. Progress in Geography, 2014, 33(6): 841−852. ]

[28] Zu R P, Xue X, Qiang M R, et al. Characteristics of near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, China[J]. Geomorphology, 2008, 96(1−2): 39−47.

[29] 杨兴华, 何清, 霍文, 等. 策勒绿洲-荒漠过渡带风沙前沿近地面不同方向的输沙特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1100−1104. [Yang Xinghua, He Qing, Huo Wen, et al. Sand transport characteristics of aeolian sand frontier in the Cele oasis-desert

transition zone in different directions near the ground[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 1100–1104. ]

[30] 杨兴华, 何清, 程玉景, 等. 策勒绿洲-荒漠过渡带风沙前沿近地表沙尘水平通量观测[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1100–1105. [Yang Xinghua, He Qing, Cheng Yujing, et al. Observation of near-surface sand and dust level flux of aeolian sand frontier in the Cele oasis-desert transition zone[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 1100–1105. ]

[31] Shi W, Dong Z, Chen G, et al. Spatial and temporal variation of the near-surface wind environment in the Sahara Desert, North Africa [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 9: 789–800.

[32] Robaa S M. Some aspects of the urban climates of Greater Cairo Region, Egypt[J]. International Journal of Climatology, 2013, 33 (15): 3206–3216.

[33] 张俊兰, 罗继, 王荣梅. 近20 a新疆升温融雪(冰)型洪水频次时空变化及大气环流型分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 339–350. [Zhang Junlan, Luo Ji, Wang Rongmei. Combined analysis of the spatiotemporal variations in snowmelt(ice) flood frequency in Xinjiang over 20 years and atmospheric circulation patterns[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 339–350. ]

[34] 乔少博. 冬季北极涛动/北大西洋涛动对后期东亚气候的影响及其年际间联系的变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Qiao Shaobo. The Effects of Winter Arctic Oscillation/North Atlantic Oscillation on the Climate of Late East Asia and Its Interannual Relationship[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. ]

[35] 高洁, 赵勇, 姚俊强, 等. 气候变化背景下中亚干旱区大气水分循环要素时空演变[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1371–1384. [Gao Jie, Zhao Yong, Yao Junqiang, et al. Spatiotemporal evolution of atmospheric water cycle factors in arid regions of Central Asia under climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1371–1384. ]

[36] NourEldeen N, Mao K B, Yuan Z J, et al. Analysis of the spatiotemporal change in land surface temperature for a long-term sequence in Africa (2003–2017)[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 488. ]

[37] 牟林, 吴德星, 周刚, 等. 温室气体浓度增加情景下大西洋温盐环流的演变[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2007, 32(1): 141–146. [Mou Lin, Wu Dexing, Zhou Gang, et al. Evolution of thermohaline circulation in Atlantic Ocean under the scenario of increasing greenhouse gas concentration[J]. Earth Sciences (Journal of China University of Geosciences), 2007, 32(1): 141–146. ]

[38] 于志翔, 于晓晶, 杨帆. 近40 a中巴经济走廊气候变化时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 695–703. [Yu Zhixiang, Yu Xiaojing, Yang Fan. Spatio-temporal characteristics of climate change in China-Pakistan Economic Corridor from 1980 to 2019 [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 695–703. ]

[39] Okin G S, Gillette D A, Herrick J E. Multi-scale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semi-arid environments[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 65(2): 253–275.

[40] 张太西, 樊静, 李元鹏, 等. 1961—2018年新疆区域高温变化与环流和海温关系[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1274–1284. [Zhang Taixi, Fan Jing, Li Yuanpeng, et al. Heat wave changes and the potential causes in Xinjiang from 1961 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1274–1284. ]

# Spatial-temporal variability of eolian dust in Egypt, North Africa

XUE Yibo[1,2], ZHANG Xiaoxiao[2], LEI Jiaqiang[2], LI Shengyu[2],
WANG Yongdong[2], YOU Yuan[2]
(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 2. National Engineering Research Center for Desert-Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

**Abstract:** The Sahara region of northern Africa is seriously affected by drought and desertification, and eolian dust activity disasters are considered severe. The arid and semi-arid regions of Egypt in northern Africa were the focus of this study. Based on daily observation data from meteorological stations between 1990 and 2020, and the data obtained from satellite remote sensing products, the spatiotemporal variability characteristics of eolian dust activity disasters in Egypt and their possible associations were assessed. The main influencing factors of eolian dust activity disasters were further discussed. The frequency of eolian dust activities in Egypt varied from 20 to 65 $d \cdot a^{-1}$ over the past 30 years, showing an overall declining trend with fluctuations. The annual average total suspended particulate (TSP) concentration in Egypt fluctuates was 400−1200 $\mu g \cdot mg^{-3}$ and showed an overall decreasing trend over the past 30 years. The highest TSP concentration occurred during spring in Egypt and reached over 2300 $\mu g \cdot m^{-3}$. Eolian dust activity in Egypt has a high intensity level when compared to other arid and semi- arid regions of the world; Egypt has the highest frequency of blowing dust, followed by dust in suspension, dust storm, and severe dust storm. The blowing dust that occurs in spring and summer accounts for more than 60% of the total eolian dust weather throughout the year. Ambient TSP concentrations in Egypt are highly correlated with the frequency of eolian dust activity due to wind erosion; There has been a deceasing trend in surface wind speed over the past 30 years, and wind erosion is an important factor affecting air quality in the oasis areas. The frequency of eolian dust activity is significantly negatively correlated with the Atlantic multidecadal oscillation with a correlation coefficient of −0.67. This work provides theoretical basis and data support for a comprehensive understanding of the spatial-temporal characteristics of eolian dust weather in Egypt, North Africa, and the prevention of dust storm disasters.

**Keywords:** Egypt; aeolian dust; spatial-temporal change; environmental evolution